

Adam Stojaspal

Využití alternativních paliv v letecké dopravě

Alternative Fuels in Air Transport

Bakalářská práce

Vedoucí práce:
Ing. Vojtěch Graf, Ph.D.

Ostrava 2021

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

STOJASPAL, A. *Využití alternativních paliv v letecké dopravě: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Institut dopravy, 2021, Vedoucí práce: Graf, V.

Bakalářská práce se věnuje problematice využití alternativních paliv v letecké dopravě. Požadavky na využívání alternativních paliv souvisí s neustále se zvyšujícím tlakem na snížení dopadu letecké dopravy na životní prostředí. Výrobci letadel a leteckých pohonných hmot proto stále hledají nová technologická řešení, která by umožnila snížení dopadu na životní prostředí za podmínek přijatelných ekonomických nároků. Předložená práce analyzuje současná alternativní paliva a možnosti jejich využití v praxi. S pomocí vhodně zvolených kritérií jednotlivá alternativní paliva mezi sebou porovnává a ukazuje jejich odlišnosti oproti konvenčně používaným palivům u leteckých motorů. Výsledky získané při výpočtu jednotlivých porovnávacích kritérií budou následně zohledněny ve SWOT analýze s jejíž pomocí je možné doporučit nejvhodnější alternativní palivo pro budoucí komerční využití.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

STOJASPAL, A. *Alternative Fuels in Air Transport: bachelor's thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Transport, 2021, Leader: Graf, V.

The bachelor thesis deals with the use of alternative fuels in air transport. The requirements for the use of alternative fuels are related to the ever-increasing pressure to reduce the environmental impact of air transport. Therefore, aircraft and aviation fuel manufacturers are constantly looking for new technological solutions that would allow reducing the environmental impact under conditions of acceptable economic requirements. The present work analyses the current alternative fuels and the possibilities of their use in practice. With the help of appropriately chosen criteria, it compares the individual alternative fuels with each other and shows their differences compared to conventionally used fuels for aircraft engines. The results obtained from the calculation of the individual comparison criteria will be subsequently taken into account in a SWOT analysis with the help of which it is possible to recommend the most suitable alternative fuel for future commercial use.

Seznam použitých zkratk

Zkratka	Český význam	Anglický význam
cjp	Cena jednotky paliva	Fuel unit price
CNG	Stlačený zemní plyn	Compressed natural gas
CO ₂ je	Oxid uhličitý na jednotku energie	Carbon dioxide per unit of energy
CO ₂ jp	Oxid uhličitý na jednotku paliva	Carbon dioxide per unit of fuel
CO ₂ lh	Oxid uhličitý na letovou hodinu	Carbon dioxide per flight hour
cplh	Cena paliva na letovou hodinu	Fuel cost per flight hour
dBa	Decibel	Decibel
DPH	Daň z přidané hodnoty	Value Added Tax
EASA	Evropská Agentura pro Bezpečnost v Letectví	European Aviation Safety Agency
eeb	Elektrická energie z baterie	Electricity from the battery
eepc	Elektrická energie z palivového článku	Electricity from the fuel cell
eh	Energetická hustota	Energy density
EU	Evropská unie	European Union
g	Gram	Gram
h	Hodina	Hour
HP	Koňská Síla	Horse Power
l	Litr	Liter
J	Joule	Joule
Kč	Koruna česká	Czech Crown
LNG	Zkapalněný Zemní Plyn	Liquefied natural gas
LPG	Zkapalněný ropný plyn	Liquefied petroleum gas
m	Metr	Meter
mp	Hmotnost paliva	Fuel mass
pm	Pístový motor	Piston engine
se	Spotřebovaná energie	Consumed energy
sp	Spotřeba paliva	Fuel consumption
TTW	--	Tank to Wing
VRA	Zařízení pro doplňování paliva do vozidel	Vehicle Refueling Appliance
WTT	--	Well to Tank
WTW	--	Well to Wing
η	Účinnost	Efficiency

Obsah

Úvod	6
1. Konvenční letecká paliva	7
1.1 Letecký petrolej	7
1.2 Letecký benzín	7
2. Alternativní paliva	8
2.1 Zemní plyn	8
2.1.1 Vlastnosti	8
2.1.2 Stlačený zemní plyn CNG	8
Bezpečnost	9
Způsoby výroby CNG	9
Výhody CNG jako paliva	9
Nevýhody CNG jako paliva	10
Využití paliva v praxi – Aviat Husky CNG	10
2.1.3 Zkapalněný zemní plyn LNG	11
Bezpečnost	11
Způsob výroby LNG	11
Výhody LNG jako paliva	12
Nevýhody LNG jako paliva	13
Využití paliva v praxi -Tu 155	13
2.1.4 Obnovitelná výroba metanu	15
Bioplyn	15
2.2 Zkapalněný ropný plyn	16
2.2.1 Výrobní technologie	16
2.2.2 Výhody LPG jako paliva	16
2.2.3 Nevýhody LPG jako paliva	17
2.2.4 Využití paliva v praxi: Mi-8TG	17
2.3 Elektrická energie	18
2.3.1 Pohon elektrickou energií z baterie	18
Historie	18
Lithiové baterie	18
Využití paliva v praxi-Pipistrel Velis Elektro	19
2.3.2 Pohon elektrickou energií z palivového článku	21
Technologie skladování vodíku	21
Výroba vodíku	22
Využití paliva v praxi ZeroAvia	23
3. Porovnání alternativních paliv a srovnání s konvenčním palivem	24
3.1 Tabulka použitých zkratk ve vzorcích	25
3.2 Spotřebovaná energie	26
3.2.1 Pístový motor	25
3.2.2 Elektrická energie-baterie	25
3.2.3 Elektrická energie-palivový článek	26

3.3	Hmotnost paliva potřebného na letovou hodinu	26
3.3.1	Konvenční palivo Avgas 100LL	26
3.3.2	CNG	26
3.3.3	LNG	27
3.3.4	LPG	27
3.3.5	Elektrická energie (baterie)	27
3.3.6	Elektrická energie (palivový článěk)	27
3.4	Objem paliva potřebného na letovou hodinu	28
3.4.1	Konvenční palivo Avgas 100LL	28
3.4.2	CNG	28
3.4.3	LNG	28
3.4.4	LPG	29
3.4.5	Elektrická energie (baterie)	29
3.4.6	Elektrická energie (palivový článěk)	29
3.5	Cena za palivo na letovou hodinu	30
3.5.1	Konvenční palivo Avgas 100LL	30
3.5.2	CNG	30
3.5.3	LNG	30
3.5.4	LPG	30
3.5.5	Elektrická energie (baterie)	30
3.5.6	Elektrická energie (palivový článěk)	31
3.6	Emise CO ₂ na letovou hodinu	31
3.6.1	Konvenční palivo Avgas 100LL	31
3.6.2	CNG	31
3.6.3	LNG	32
3.6.4	LPG	33
3.6.5	Elektrická energie (baterie)	33
3.6.6	Elektrická energie (palivový článěk)	33
4.	SWOT analýza	35
4.1	Aplikace SWOT analýzy	35
4.1.1	SWOT Konvenční palivo Avgas 100LL	35
4.1.2	SWOT CNG	36
4.1.3	SWOT LNG	36
4.1.4	SWOT LPG	37
4.1.5	SWOT Elektrická energie (baterie)	38
4.1.6	SWOT Elektrická energie (palivový článěk)	38
4.2	Vyhodnocení	39
5.	Závěr	40

Úvod

Letecká doprava je neodmyslitelně jedním z moderních výdobytků naší společnosti. Každý den se letecky přepravuje obrovské množství lidí a zboží. Je to nejspolehlivější, nej pohodlnější a nejbezpečnější prostředek dálkové dopravy, který má lidstvo k dispozici. Bez letadel si již nedokážeme představit naši civilizaci. Létání šetří spoustu času a peněz lidem, kteří potřebují cestovat na velké vzdálenosti.

Bakalářská práce pojednává o palivech používaných v letecké dopravě. Důvodem k vypracování bakalářské práce je sílící tlak na snižování environmentálních dopadů letecké dopravy. V potaz je třeba brát také ekonomiku provozu a technické omezení konstrukce letadla, proto by měly být paliva co možná nejlehčí a zabírat málo prostoru.

Prvním palivem použitým v letectví se stal roku 1903 benzin na letounu Wright Flyer bratří Wrightů, který spolu s leteckým petrolejem stále tvoří dvě nejpoužívanější paliva v letectví.

Cílem bakalářské práce je analyzovat nekonvenční paliva a možnosti jejich využití v praxi. Díky vhodně zvoleným kritériím bude možné alternativní paliva porovnat a poukázat na jejich výhody či nevýhody oproti konvenčním palivům. Výsledky výpočtu jednotlivých porovnávacích kritérií budou zpracovány ve SWOT analýze, z výsledků analýzy bude možné doporučit vhodné palivo pro další vývoj ke komerčnímu využití.

1 Konvenční letecká paliva

V dnešní době jsou nejpoužívanějšími palivy na světě letecký petrolej (avtur) a letecký benzín (avgas).

1.1 Letecký petrolej

Palivo bylo vyvinuto v 50. letech 20. století, jeho bod tuhnutí je nižší nebo roven 40 °C. Jet A-1 má oproti Jet-A nižší bod tuhnutí a to minus 47 °C nebo méně. Přestože jsou obě paliva vyráběna podle různých specifikací, lze je použít zaměnitelně. Zásadní rozdíl spočívá v tom, že palivo Jet A neobsahuje přísady pro rozptylování statické elektřiny, paliva Jet A-1 tyto přísady obsahují.

Palivem pro tryskové motory bývá většinou bezbarvá nebo světle žlutě zbarvená kapalina, kdy nejpoužívanějšími možnostmi jsou typy Jet A a Jet B. Nejpodstatnějším rozdílem mezi nimi je bod tuhnutí. [1]

1.2 Letecký benzín-Avgas

V současné době se používají dva hlavní druhy Avgas 100 a 100LL (nízko olovnatý). Avgas 100 je standardní vysokooktanové palivo určené pro pístové motory, má vysoký obsah olova, je zbarveno do zelena. Avgas 100LL-podobné složení jako Avgas 100, obsahuje méně olova, je zbarven do modra.

Avgas se používá k pohonu malých letadel, jejichž motory fungují na stejných principech jako zážehové motory v automobilech. K letu je zapotřebí mnohem vyššího výkonu, proto je nezbytné využití vysokooktanového paliva. Toto palivo je vhodné k pohonu malých letadel poháněnými pístovými motory. Jedná se většinou o malá letadla s krátkým doletem, používaná leteckými kluby, soukromými piloty nebo výcvikovými školami. Prodej paliva Avgas je ve srovnání s prodejem paliva Jet malý. [1]

2 Alternativní paliva

2.1 Zemní plyn

Hlavní obtíže při přechodu letecké dopravy na zemní plyn spočívají v potřebě vytvořit odpovídající infrastrukturu: továrny, sklady, čerpací stanice. Také je třeba vzít v úvahu psychologii zákazníků, s předpoklady týkajícími se neobvyklého plynného paliva.

2.1.1 Vlastnosti

Zemní plyn, který se skládá z přibližně 85 % metanu, proměnným množstvím uhlovodíků 5 % a 10 % inertních plynů (N_2 , CO_2 ...). Plyn je bezbarvý, netoxický, hořlavý, výbušný, bez chuti a bez zápachu. Zemní plyn je fosilní palivo a není obnovitelným zdrojem, ale jeho zdroje jsou po dobu asi 150 let mnohem větší než ropa s možností dalších ložisek. Lze jej použít v benzínových i naftových motorech. Motory na zemní plyn produkují podstatně méně znečišťujících látek (oxid dusíku, oxid uhelnatý, oxid uhličitý, pevné částice, polyaromatické uhlovodíky, aldehydy, aromatické látky včetně benzenů) než běžné motory. Letadla používající stlačený zemní plyn mají nižší provozní náklady. Metan netvoří uhlíkové usazeniny na pístech, ventilech a zapalovacích svíčkách, nevymyje olejový film ze stěn válce, neředí olej v klikové skříni. [2]

2.1.2 Stlačený zemní plyn CNG

Letadla používající stlačený zemní plyn mají nižší provozní náklady. CNG (Compressed Natural Gas) stlačený zemní plyn, v zásobníku paliva bývá stlačen na tlak až 200 bar. Nádrže na stlačený zemní plyn mohou být vyrobeny z oceli, hliníku, kompozitu nebo kombinací těchto materiálů (Obr. 2.1). [2]



Obr. 2.1 CNG nádrž z hliníku a karbonových vláken [3]

Bezpečnost

V případě nehody jsou tlakové lahve odtlačovány pojistným ventilem, tlaková láhev nemůže prasknout v důsledku výbuchu ani v případě požáru. CNG je lehčí než vzduch, v případě náhodného úniku plynu je vypouštěn do atmosféry, nezůstává na zemi, čímž se snižuje riziko vzniku požáru. [4]

Způsoby výroby CNG

V závislosti na způsobu tankování se používají rychloplnicí stanice (doba plnění plynu je srovnatelná s čerpáním kapalných paliv, tj. 3–5 minut) a stanice pro pomalé plnění (obvykle několik hodin).

Stanice pro rychlé plnění

Zemní plyn je odebírán kompresorem z plynové přípojky a po vysušení (odstranění veškerého kondenzátu a nečistot) jej v několika stádiích stlačuje na tlak 300 barů. Stlačený zemní plyn je skladován ve vysokotlakých nádržích.

Stanice pro pomalé plnění

Plnění nádrží zemním plynem probíhá přímo přes kompresor, přičemž je možné současně natankovat několik dopravních prostředků. Plnění obvykle probíhá během několika hodin, když dopravní prostředek není v provozu. To znamená přes noc nebo během přestávky.

V praxi je u pomalých zařízení užívána řada jmen, oficiální mezinárodní název je VRA – Vehicle Refueling Appliance. Často se také používá název FuelMaker, odvozený od dominantního kanadského výrobce. V českém jazyce je použití tohoto zařízení nejlépe popsáno pod názvem „domácí plnička plynu“.

Norma definuje zařízení s pomalým plněním jako zařízení, jehož hlavní součástí je kompresor na zemní plyn a které neobsahuje zásobník plynu. Zařízení je omezeno maximální kapacitou 20 m³ / hod., Maximálním plnicím tlakem 26 MPa a maximální skladovací kapacitou plynu 0,5 m³. [3]

Výhody CNG jako paliva

- nízké emise znečišťujících látek v důsledku nízkého podílu uhlíku (hlavní složkou je metan CH₄)
- spalování je pomalejší, motor je tišší než u benzínu nebo nafty
- v případě úniku se plyn rychle rozptýlí (nevlévá se jako benzín a nezůstává na zemi jako LPG)
- plně hermetické zařízení pro doplňování paliva a na skladování, žádné znečištění atmosféry od výparů
- nejvyšší oktanové číslo mezi motorovými palivy - 110 až 120
- nejvyšší výhřevnost mezi motorovými palivy, pro CNG 50 MJ / kg, pro benzín 45 MJ / kg
- výrazná úspora paliva, dokonce i pro vznětový motor

- žádný vliv čerpací stanice na kvalitu paliva, zemní plyn – pochází přímo z městského středotlakého plynovodu, nikoli z nádrží dané stanice
- zemní plyn je na čerpací stanice dodáván městským plynovodem, není třeba přepravovat CNG cisternovými vozy

Nevýhody CNG jako paliva

- potřeba instalovat vysokotlaké lahve na 20 MPa, z těžké oceli nebo drahé kompozitní lahve
- potřeba stlačit plyn přes čerpací stanici na vysoký tlak
- v případě vznětových motorů – jejich přizpůsobení přívodu CNG vyžaduje systém zážehu nebo vstřikování malé dávky paliva do spalovací komory se současným vstřikováním CNG do sacího potrubí
- nutnost vybudovat CNG čerpací stanice na letištích
- větší objem zabraný CNG než u benzínu, množství stlačeného plynu ekvivalentní k litru benzínu zabírá více než 4 litry.

Využití paliva v praxi – Aviat Husky CNG

Na AirVenture 2013 bylo představeno letadlo na zemní plyn. Malý stroj Husky od americké společnosti Aviat je vybaven dvoupalivovým motorem, který kromě pohonu leteckým benzínem pracuje i na stlačený zemní plyn. (Obr. 2.2)

Letoun je poháněn čtyřválcovým motorem Lycoming o výkonu 200 HP, který byl upraven pro provoz na plyn. Za tímto účelem byly použity nové písty, které umožnily zvýšit kompresní poměr z 8,5 na 10. Výsledkem je, že je možné plně využít potenciál zemního plynu s oktanovým číslem 138, zatímco letecký benzín je 100 oktanový. Proto je letadlo kromě standardních 50 - galonových benzínových nádrží vybaveno i nádrží na CNG. Letadlo používá odnímatelnou nádrž CNG typu IV (s vložkou z uhlíkových vláken). Pro nádrž, která váží 43 kg se vejde 32 m³ CNG.

Mezi výhody tankování na CNG uvádí výrobce snížené provozní náklady, nižší emise škodlivých složek výfukových plynů, zejména sloučenin olova, které jsou obsaženy v leteckém benzínu. Je také velmi důležité snížit emise oxidu uhelnatého o 90–97 %, čímž se sníží riziko vstupu tohoto toxického plynu do kokpitu. Motorový olej degraduje méně, protože CNG olej nekontaminuje ani neředí v klikové skříni. Vyšší oktanové číslo paliva navíc umožňuje motoru vyvinout větší výkon, a to i ve vysokých nadmořských výškách.

Podle odborníků může používání CNG významně snížit náklady na letecký výcvik. Při spotřebě leteckého benzínu přibližně 10 galonů za letovou hodinu snižuje použití plynného paliva náklady na let o 40–60 \$ za hodinu. Plné palivové nádrže Husky umožňují 7hodinový let s běžícím motorem na 65 % maximálního výkonu. Výrobce odhaduje, že instalace plynového systému pro Husky zvýší jeho cenu o 12 000 až 15 000 USD ve srovnání s cenou benzínového letadla. [4] [5] [6]



Obr. 2.2 Husky Aviat s CNG nádrží pod trupem letounu [4]

2.1.3 Zkapalněný zemní plyn LNG

Zkapalněný zemní plyn se dnes využívá jako palivo do pístových motorů, v praxi se již využívají lodě, kamiony a vlaky s pohonem na LNG.

LNG (ang. liquefied natural gas), - zemní plyn v kapalném stavu agregace, tj. při teplotě pod -162°C (teplota varu metanu, hlavní složky LNG). Během zkapalňování se objem sníží 570krát, čímž se zvýší "energetická hustota" zkapalněného zemního plynu. Zkapalněný zemní plyn má hustotu $400\text{ kg} / \text{m}^3$. Z hlediska chemického složení je LNG čistější metan než zemní plyn, což je způsobeno vyšším stupněm oddělení nemetanových složek zemního plynu před skutečným zkapalněním.

Existence kapalné fáze zemního plynu je fyzicky možná při velmi vysokých tlacích a teplotách pod -80°C . Plynná fáze je lehčí než vzduch a hoří v plynném stavu po vytvoření hořlavé směsi se vzduchem. Před vlastním spalováním proto vyžaduje zpětné odpaření. [7]

Bezpečnost

Aby se minimalizovala rizika zranění nebo poškození letadla, je důležité, aby materiál použitý pro systém LNG byl certifikován pro kryogenní teploty a aby systém měl zabudován přetlakové ventily.

Dále je třeba dbát zvýšené opatrnosti při plnění paliva z důvodu možného vzniku omrzlin.

Způsob výroby LNG

Procesy zkapalňování nejsou z hlediska postupu vůbec složité. Nezpracovaný plyn je přiveden do fázového separátoru, kde se odstraní tuhé části, voda a kondenzát. Takto zpracovaný plyn dále putuje do úpravní aminů. V tomto zařízení se přidává množství tekutých alkylaminů (obecně pouze aminy). Tyto aminy způsobí odstranění sulfanu a oxidu uhličitého. Dochází k odstranění kyselých

sloučeniny. Před samotným zkapalněním, je ještě potřeba zbavit plyn přebytečné vody. Toto se provádí v sušičce plynů. Dále je potřeba plyn zbavit přebytečné rtuti. Plně zpracovaný plyn je pak přiveden do nízkoteplotního mrazicího systému, kde už vzniká zkapalněný plyn. I takto zpracovaný plyn pořád obsahuje propan, butan a těžší uhlovodíky. Ty se při zkapalňování odstraňují. Samotný proces zkapalňování vyžaduje značnou spotřebu energie, a to až 25 % z množství energie obsažené ve zkapalněném plynu. [8]

Existují tři nejčastěji využívané způsoby zkapalňování:

- **Klasická kaskáda**

Tento cyklus využívá tři oddělené chladicí tekutiny a to propan, etylen a metan ve třech stlačovacích chladicích cyklech. Voda a vzduch je nejlevnější způsob chlazení, takže každý plyn je nejdříve ochlazen na teplotu okolí předtím, než se dostane do výměníku tepla se zkondenzovaným chladivem. Každé chladivo je také zchlazeno svým vlastním výparem před expanzí ve škrticí klapce. Nakonec, každý z více vařících chladiv může být expandován ve více než jednom tlaku, například propan za středního tlaku přechlazuje jak etylen, tak i metan. Následně dochází ke druhé expanzi za nižšího tlaku pro chlazení pouze metanu. Etylen je taky využit při dvou tlacích k ochlazení metanu ve dvou stupních před konečnou expanzí. [8]

- **Míšený chladicí cyklus**

V takovýchto cyklech, chladivo proudí v uzavřeném proudu a působí v několika úrovních přenosu tepla při různých tlacích. Míšené chladivo je vyrobené za použití těžších uhlovodíků ze samotného zemního plynu. Mezi výhody patří menší počet kompresorů a výměníků, menší nutný prostor, je jednodušší na provoz a nižší cena. [8]

- **Předchlazený smíšený cyklus chladiva (C3MR cyklus)**

Tento proces byl vyvinut později a používá se pro všechny nejnovější zařízení na výrobu LNG. Kombinuje jednoduchost cyklu smíšeného chladiva s účinností kaskádového cyklu a nyní se používá u více než poloviny zařízení produkující LNG. Tento proces je nyní preferovanou volbou, pokud jde o flexibilitu a efektivitu nákladů. Skládá se z míšeného zkapalňovacího chladicího cyklu a odděleného cyklu pro předchlazení zemního plynu a zkapalňovacího chladiva. Míšené chladivo skládající se z dusíku, metanu, etanu, propanu a někdy i butanu, je stlačeno a zchlazeno za pomoci chladicího média na okolní teplotu a před-zchlazovacího chladiva. Směs, která je rozdělena do lehkého a těžkého proudu, je zkapalněna ve svazku výměníků a následně expandována do pláště výměníku, aby sloužila jako chladivo. Chladivo je postupně odpařováno a ohříváno proti zemnímu plynu a vysokotlakému chladivu ve svazcích (auto-chlazení). Chladivový výpar ze spodu pláště výměníku je znovu stlačen a smyčka je uzavřena. [8]

Výhody LNG jako paliva

- Cca 570krát menší objem v porovnání se zemním plynem v plynném skupenství. Z toho vyplývá vyšší dolet letadel využívající LNG oproti CNG, který je na srovnatelné úrovni

s klasickými pohonnými hmotami – 1 litr LNG energeticky odpovídá cca 0,67 litru benzínu a 0,59 litru nafty.

- Vysoká energetická hustota, která je srovnatelná s palivy získávanými z ropy.
- V porovnání s CNG mají navíc nádrže na LNG podstatně nižší hmotnost a díky menšímu objemu palivových nádrží mají letadla na LNG větší užitečný prostor.

Nevýhody LNG jako paliva

- Uchovávání zkapalněného plynu za velmi nízkých teplot, což je ekonomicky i technologicky velmi náročné. Při delší odstávce může docházet k odparu paliva z nádrže, množství odpařeného plynu odpovídá běžně 0,17 % LNG za den.

Celkově je LNG v porovnání se stlačeným zemním plynem složitější a nákladnější technologie. Samotný proces zkapaňování zemního plynu je energeticky velmi náročný a představuje jednu z hlavních nevýhod tohoto paliva.

Využití paliva v praxi – Tu-155

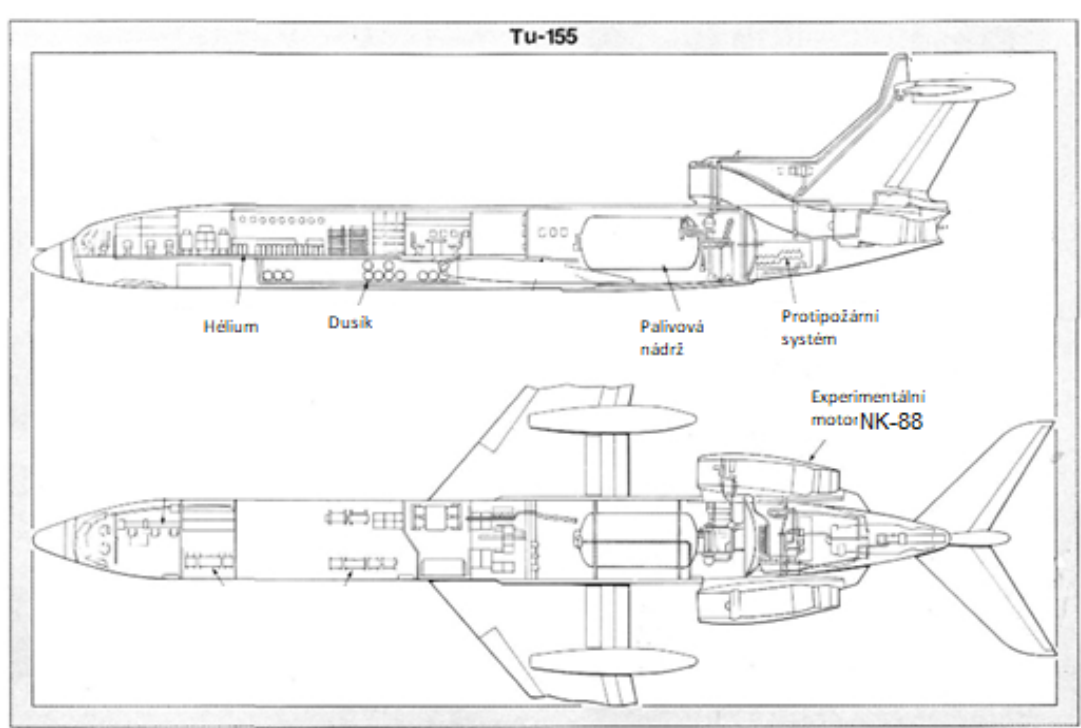
Tu-155 je létající laboratoř založená na letadle Tu-154 pro letový výzkum motorů spalujících kryogenní palivo za reálných podmínek. V 70. letech se prohloubil nedostatek tradičních druhů paliv (petrolej, benzín) a bylo nutné jej nahradit zemním plynem, který je pro letectví ve zkapalněném stavu nejpříjemnější. Dne 15. dubna 1988 uskutečnil Tu-155 svůj první let. Letoun prošel rozsáhlou sadou testů, během kterých bylo stanoveno 14 světových rekordů, mezinárodní let na trase Moskva – Bratislava (Československo) - Nice (Francie), Moskva – Hannover (Německo). Hlavní vlastnosti Tu-155 jsou podobné základnímu Tu-154B. Objem nádrže na kryogenní palivo je 20 m³, maximální doba letu na LNG je 120 minut. Celkem, bylo provedeno 95 letů na zkapalněný zemní plyn.

Pro účely posouzení letu s možností využití LNG na Tu-155 ve srovnání se základním letounem Tu-154 byly provedeny následující konstrukční změny:

- Instalace prstenovitého výměníku tepla na místo obraceče tahu.
- Ve speciálně vyhrazeném prostoru kabiny v zadní bývalé přetlakové části letadla byla instalována přetlaková palivová nádrž s vysoce účinnou tepelnou izolací, která pojme zkapalněný zemní plyn s teplotou -162 °C.
- Upravil se palivový systém letadla. Experimentální palivová soustava zahrnovala: systém pro dodávku paliva do motoru, systém pro udržování tlaku v nádrži s nouzovým bezpečnostním zařízením, systém pro cirkulaci, natlakování nádrže, systém pro nouzový odtok kryogenního paliva. Systém dodávky paliva sestával z dvoustupňového odstředivého čerpadla kryogenního paliva poháněného motorovými spaliny, tepelně izolovaným potrubím a kryogenních ventilů.
- K řízení a monitorování provozu kryogenního komplexu byly do letadla instalovány tyto další systémy: dusík, který nahrazuje atmosféru v letadlových prostorech a varuje posádku v případě úniku kryogenního paliva dlouho před koncentrací možného výbuchu.
- Systém řízení vakua v tepelně izolačních dutinách.

- Namísto standardního pravého motoru NK-8-2U byl instalován experimentální motor NK-88. (Obr. 2.3)

Celkově bylo do letadla nainstalováno asi 30 nových systémů.



Obr. 2.3 Vnitřní uspořádání TU-155 [9]

V průběhu zkušebního programu bylo prověřeno chování letounu i motoru NK-88 ve všech letových režimech až do výšky 13 000 m. Letové výkony jediného exempláře letounu typu Tu-155 byly prakticky identické jako letové výkony letounu typu Tu-154B. Protože program Tu-155 splnil všechna očekávání, v průběhu 90. let, bylo zpracováno několik projektů plnohodnotných dopravních letounů s pohonem na zemní plyn (Obr 2.4). Realizaci projektů letounů ale zabránila těžká ekonomická krize, která na počátku 90. let zachvátila všechny postsovětské republiky, včetně Ruska. [10] [11]



Obr. 2.4 Projekty letounů na LNG [12]

2.1.4 Obnovitelná výroba metanu

Obnovitelná výroba metanu je možná ve formě bioplynu.

Bioplyn

Bioplyn je produktem anaerobního trávení organických látek, včetně organických sloučenin získaných z domácího a průmyslového odpadu, zvířecích exkrementů, kalů z čistíren odpadních vod, rostlin z energetických plodin, biologicky rozložitelného odpadu na skládkách nebo jiných biologicky rozložitelných surovin v anaerobních podmínkách. V průmyslových zemích se bioplyn vyrábí anaerobní fermentací organických substrátů, která probíhá ve velkých bioplynových stanicích. Vzniká také při rozkladu organického odpadu za anaerobních podmínek na skládkách, proto se mu někdy říká „skládkový plyn“. Během procesu anaerobní digesce se organická hmota rozkládá v několika krocích různými druhy mikroorganismů. Jedná se o plyn, který vzniká mikrobiálním rozkladem organické hmoty za nepřístupu vzduchu. Majoritní složky: metan (cca 60-70 %) a oxid uhličitý (cca 30-40 %).

Energeticky využitelný bioplyn je vyráběn v bioplynových stanicích, čističkách odpadních vod (kalový plyn) a vzniká také v tělesech komunálních skládek (skládkový plyn). Konečnými produkty jsou: plyn obsahující hlavně metan a oxid uhličitý – označovaný jako „bioplyn“ a odpad nebo pevná frakce sestávající ze zbytku po fermentaci organické suroviny, který se označuje jako „digestát“.

Složení bioplynu a množství jeho produkce závisí na složení substrátu použitého při anaerobní digesti.

Aby se zlepšila kvalita surového bioplynu, je výsledný plyn obvykle čištěn od nežádoucích látek, jako je sirovodík, kyslík, dusík, voda a pevné částice. Tím se zabrání korozi a mechanickému opotřebení zařízení, ve kterých se jako palivo používá bioplyn. Jedná se o plyn upravený na kvalitu a čistotu potrubního zemního plynu = > 95% CH₄ [13] [14]

2.2 Zkapalněný ropný plyn

Toto palivo je v naší zemi jednou z nejrozšířenějších forem alternativního zdroje energie. LPG (zkratka pro Liquefied Petroleum Gas) - je zkapalněná směs dvou uhlovodíků: propanu (C₃ H₈) a butanu (C₄ H₁₀) v různých poměrech. Poměr těchto dvou plynů nepodléhá žádnému mezinárodnímu standardu, proto může mít každá země jiný poměr těchto plynů. Dále se rozlišuje mezi letní a zimní směsí. V letní směsi je více butanu a v zimní směsi více propanu. To je způsobeno fyzikálními vlastnostmi obou plynů. Butan je výhřevnější než propan, ale propan se odpařuje při nižších teplotách. Získává se jako vedlejší produkt při rafinaci ropy, lze jej získat také z ložisek zemního plynu.

LPG je bez barvy a bez zápachu. Jako kapalný plyn se používá k pohonu spalovacích motorů. Má vyšší bod vzplanutí, což zvyšuje jeho bezpečnost při používání. Bod varu je -42 °C, což znamená, že při normální teplotě je LPG v plynném stavu a je skladován v tlakových nádržích. Bod tuhnutí je velmi nízký, palivo při nízkých teplotách nezamrzá. LPG má také ve srovnání s benzínem o něco vyšší oktanové číslo, spalovací motor běžící na LPG by tedy měl mít upravený kompresní poměr a časování zapalování. [15]

2.2.1 Výrobní technologie

Výrobní technologie jsou následující:

- Krakování – propan a butan se vyrábějí stejným způsobem jako jiné ropné produkty krakováním, tj. chemický technologický proces prováděný pod vysokým tlakem a teplotou v katalyzátoru bez vodíku. Účelem tohoto procesu je rozdělit delší molekuly uhlovodíků na kratší molekuly. LPG se zde vyrábí jako vedlejší produkt.
- Reformování benzínových frakcí – jedná se o chemicko-technologický proces, úprava uhlovodíků prováděna za vysokého tlaku a teploty za přítomnosti katalyzátoru ke zvýšení anti-klepacích vlastností (zvýšení oktanového čísla).
Tento proces produkuje hlavně nasycené uhlovodíky.
- Hydrogenace – je to chemicko-technologický proces pod vysokým tlakem a teplotou, probíhající v přítomnosti vodíku, jehož účel je zušlechťování těžko vroucích ropných frakcí. LPG je zde vedlejším produktem.

Rafinace ropy produkuje asi 1 % metanu a etanu, 2 % LPG, 20 % benzinu, 30 % petroleje, 40 % nafty a 7 % těžkého topného oleje. [16]

2.2.2 Výhody LPG jako paliva

- LPG se skladuje při tlaku 1 až 2,5 MPa, díky tomu má LPG nádrž v porovnání s nádrží na CNG nižší hmotnost.
- Cena paliva je v porovnání s benzínem nižší.
- Snížení emisí CO₂ (o cca 20 % méně než u benzínu).
- Snížení emisí ostatních znečišťujících plynů.
- LPG neznečišťuje podzemní zdroje, protože je nerozpustný ve vodě.

2.2.3 Nevýhody LPG jako paliva

- Počáteční investice.
- Zvýšení spotřeby cca o 10 %.
- Lehké snížení výkonu motoru přibližně o 5 %.
- Životnost LPG nádrže.
- LPG je bezolovnaté palivo, které může způsobit zrychlené opotřebení ventilů a sedel ventilů v pístových motorech, které nejsou přizpůsobeny bezolovnatému palivu.

2.2.4 Využití paliva v praxi: Mi-8TG

Mi-8 je víceúčelový vrtulník navržený v konstrukční kanceláři Michaila Mil. První prototyp byl uveden do vzduchu v roce 1961.

Vrtulník měl řadu civilních a vojenských variant, včetně Mi-14 – námořního vrtulníku. Pro účel této práce se jako nejzajímavější jeví vývojová verze Mi-8TG, která měla motory Klimov TV2-117TG na LPG (Obr 2.5).

Odlišnosti od klasického Mi-8 spočívají v instalaci motoru TV2-117TG a instalaci palivových nádrží na LPG.

Vrtulníkový motor Klimov TV2-117A je turbo hřídelová pohonná jednotka určená k pohonu vrtulníků, TV2-117TG je vícepalivová varianta motoru, schopná provozu na LPG.

Zkoušky Mi-8TG na LPG byly zahájeny v roce 1987. Dne 7. září téhož roku provedl vrtulník první zkušební let, přičemž pouze jeden ze dvou motorů byl poháněn LPG. Zkouška byla velmi úspěšná a tak v polovině 90. let, po řadě dalších zkoušek, byly zahájeny závěrečné zkoušky předprodukční verze vrtulníku.

Motory Mi-8TG měly schopnost běžet pouze na LPG, samotné letecké palivo nebo jakoukoli jejich směs. Letové vlastnosti upravené verze se ukázaly prakticky stejně dobré jako u tradičně poháněných variant, a dokonce lepší v podmínkách nízké okolní teploty. Přesto stroj nikdy nespátřil sériovou výrobu a jeho testy definitivně skončily kolem roku 2000. [17] [18]



Obr. 2.5 Vrtulník Mi-8TG s nádržemi na LPG [17]

2.3 Elektrická energie

Ačkoliv se o elektro letadlech uvažuje už od 2. poloviny 20. století, reálně se první prototypy začaly objevovat teprve před několika lety. Může za to především intenzivní rozvoj technologie baterií a elektrických pohonných systémů. Během následujících několika dekád se tak může proměnit pohon malých letadel.

2.3.1 Pohon elektrickou energií z baterie

Následující kapitola se bude věnovat historii, lithiovým bateriím a letounu Pipistrel Velis Elektro.

Historie

Baterie jsou nejběžnější způsob uložení elektrické energie, kvůli jejich relativně vysoké kapacitě. Nejstarším zdrojem elektřiny byly baterie, které jako první poháněly vzducholodě v devatenáctém století. Tyto rané baterie byly velmi těžké a až s příchodem technologií, jako jsou nikel-kadmiové dobíjecí typy ve druhé polovině dvacátého století, se baterie staly praktickým zdrojem energie pro letadla.

Lithiové baterie

Mezi moderní typy baterií patří lithiové baterie. Významným pokrokem v oblasti skladování elektřiny je vývoj bezpečných lithiových baterií. Při napětí jednoho článku 3,6 V je pro tyto pohony nutné uspořádat články do série. Aby se snížily ztráty v distribučních kabelech, měničích a vinutích motoru, je vhodné volit napětí vyšší než napětí palubní (24 V nebo 12 V) - běžné hodnoty jsou 100 až 300 V.

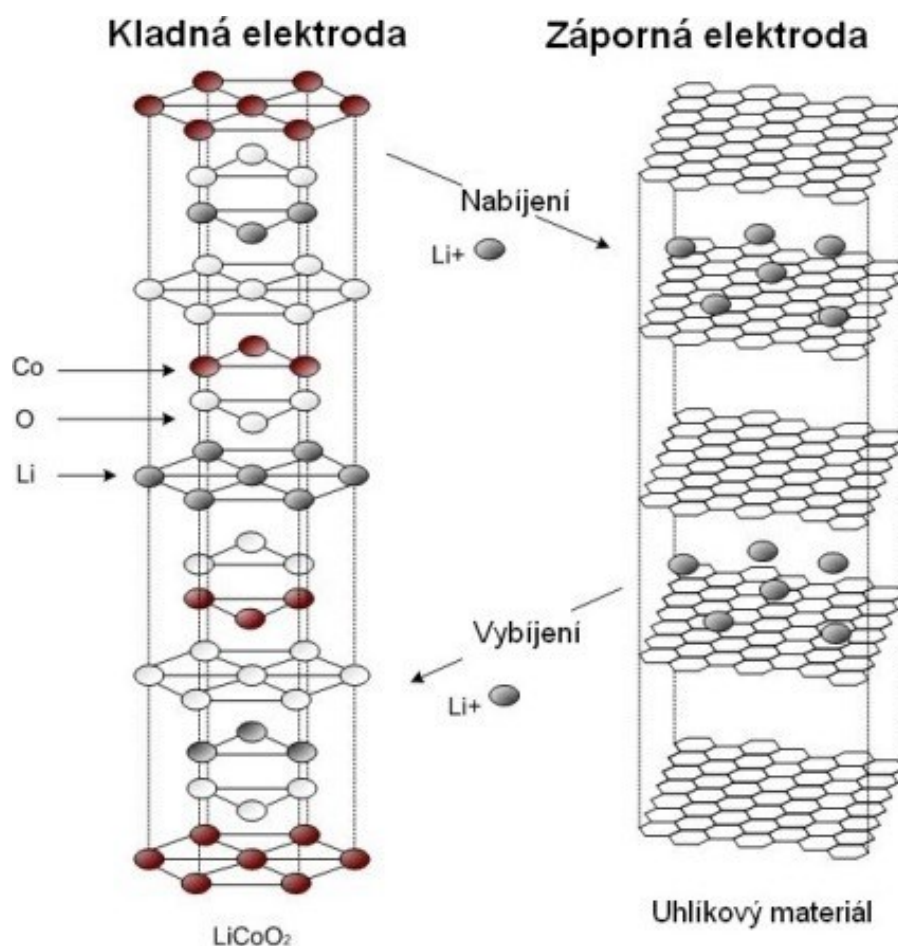
Praktické problémy s používáním kovového lithia vyplývají z jeho mimořádné oxidační aktivity. Kontakt lithia s atmosférickým kyslíkem způsobuje spalování, které může být v závislosti na

vlastnostech prostředí výbušné. Tuto nepříjemnou vlastnost lze překonat důslednou ochranou povrchu nebo použitím méně aktivních sloučenin lithia. [19]

Princip funkce lithiové baterie

Lithiové baterie jsou baterie s bezvodým elektrolytem. Elektrolytem je nejčastěji lithium hexafluorofosfát LiPF_6 v nepolárním organickém rozpouštědle a záporná elektroda je vyrobena z uhlíkového materiálu. Během nabíjení se lithiové ionty pohybují od kladné k záporné elektrodě (Obr 2.6). Hlavní rozdíl od jiných typů baterií spočívá v tom, že lithiové ionty interkalují pouze do struktury záporné elektrody (interkalace vmístit se do mřížky materiálu, aniž by chemicky reagoval se samotným materiálem).

To znamená, že v podstatě nedochází k žádné chemické reakci, a tedy k velmi dlouhé životnosti bez zásadních změn ve výkonu baterie. [20]



Obr. 2.6 Princip funkce lithiových akumulátorů [20]

Využití paliva v praxi – Pipistrel Velis Elektro

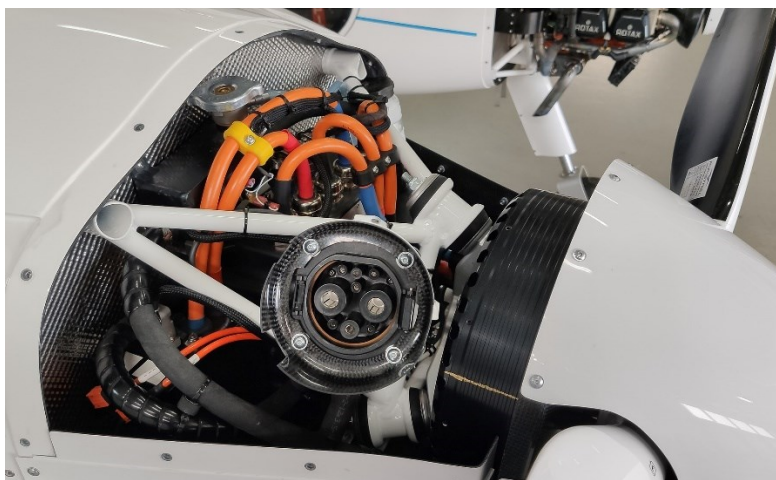
Velis Electro je první letoun na elektrický pohon na světě, který získal typový certifikát (EASA.A.573). Dvoumístný letoun určený především pro výcvik pilotů je z hlediska technologických inovací a nákladů na provedení letu průlomový. Velis Electro lze provozovat komerčně a je plně schválen pro výcvik pilotů i pro jiné operace. Díky své tichosti může Velis Electro přivést letecký

výcvik mnohem blíže městským oblastem, aniž by nepříznivě ovlivnil kvalitu životního prostředí. Díky hladině hluku pouze 60 dBa je Velis Electro podstatně tišší než jiná letadla a neprodukuje vůbec žádné spaliny. Jeho revoluční hnací ústrojí včetně baterií je chlazené kapalinou a v rámci certifikačního procesu prokázalo schopnost odolávat poruchám, teplotním únikům baterií a nárazovým zatížením. Velis Electro může pracovat v chladu, teple a dešti. Snížený počet pohyblivých dílů značně snižuje náklady na údržbu a riziko poruch je dále minimalizováno díky integrované diagnostice. Tato zvýšená spolehlivost umožňuje více než zdvojnásobit životnost prvků hnacího ústrojí ve srovnání s předchozí generací elektrických letadel.

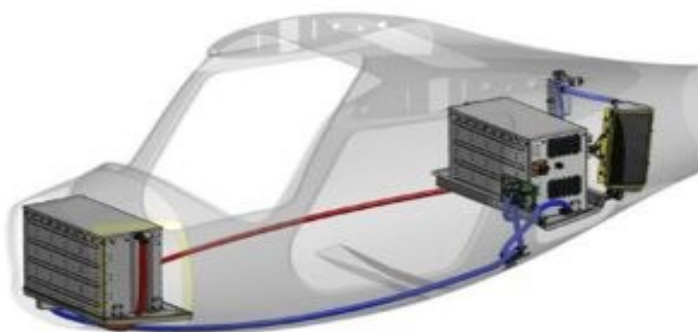
V rámci certifikace typu společnost Pipistrel prokázala, že dosahuje nejvyšší úrovně bezpečnosti, dokonce překračuje úroveň požadovanou pro konvenčně poháněná letadla.

Velis Electro je vybaven elektrickým motorem Pipistrel E-811-268MVLC o výkonu 57,6 kW s certifikací (TC č. EASA.E.234). Motor byl vyvinutý s partnery EMRAX a EMSISO. (Obr 2.7)

Energii dodává elektrický systém 345 VDC, který obsahuje dvě paralelně zapojené baterie Pipistrel PB345V124E-L, hmotnost jedné baterie je 70 kg, celková kapacita je 24,8 kWh. Jeden blok akumulátorů je umístěn v předí letounu a druhý za kabinou (Obr 2.8). Tím je zajištěno zálohování zdroje energie: v případě poruchy baterie by se nefunkční baterie automaticky odpojila od systému. Jedna baterie je schopna samostatného provozu a má dostatek energie pro stoupání a pokračování v letu. [21]



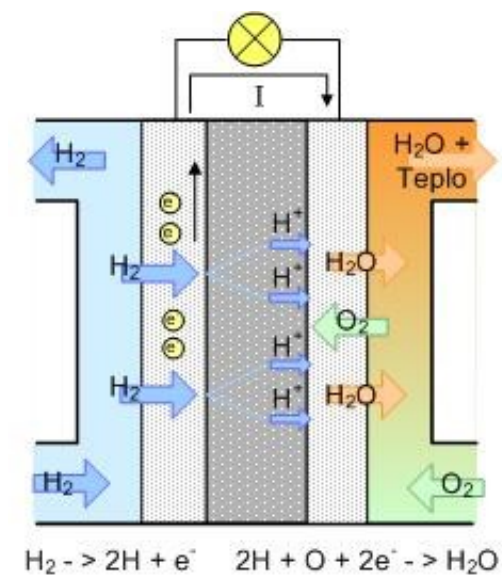
Obr. 2.7 Motorový prostor [21]



Obr. 2.8 Uložení baterií [21]

2.3.2 Pohon elektrickou energií z palivového článku

Ve své podstatě je palivový článek podobný galvanickému článku. Ke kladné elektrodě je přiváděno palivo, k záporné elektrodě pak okysličovadlo. V prostoru mezi elektrodami se pak obě látky katalyticky slučují (Obr 2.9). V tomto případě se používá vodík jako palivo a kyslík jako okysličovadlo, přičemž jako odpad se produkuje čistá voda a teplo.



Obr. 2.9 Schéma znázornění palivového článku [19]

V moderních palivových článcích je nejčastěji používaným palivem vodík (H_2), zatímco oxidantem je kyslík (O_2) dodávaný do zařízení v čisté formě nebo společně s atmosférickým vzduchem. [22]

Technologie skladování vodíku

Vývoj bezpečného, cenově dostupného a energeticky efektivního způsobu uskladnění vodíku je klíčový pro budoucnost vodíkových technologií a palivových článků.

Plynný vodík

Nejdéle používanou metodou je skladování vodíku v plynném stavu. Plynný vodík lze stlačit na vysoký tlak, aby se zvýšila jeho energetická hustota. V současné době je technicky možné skladování pod 450-700 bar (současný technologický limit je 1000 bar). Probíhají práce na použití lehkých kompozitních materiálů, které mohou výrazně snížit hmotnost nádrží na plynný vodík pro aplikace v automobilovém a leteckém průmyslu. [23]

Kapalný vodík

Kapalný vodík musí být skladován při teplotě nižší než $-253\text{ }^\circ\text{C}$. Energetická hustota je mnohem vyšší než hustota stlačeného vodíku, ale zkvalitňování a udržování vodíku v kapalném stavu je energeticky velmi náročné. Kvůli složitosti je tento systém vhodnější pro velké objemy. [23]

Výroba vodíku

Vodík lze vyrábět mnoha způsoby z mnoha různých vstupních zdrojů. Celosvětové produkci současné době dominuje produkce vodíku z fosilních paliv. Použití vodíku vyrobeného tímto způsobem může pomoci snížit místní produkci některých škodlivých látek, ale v celosvětovém měřítku by to vedlo pouze k méně ekonomickému využití primární energie a souvisejícímu zvýšení produkce oxidu uhličitého.

Parní reforming zemního plynu

Tato technologie je v současnosti nejlevnější a nejrozšířenější metodou výroby vodíku. Teplo potřebné pro reformovací reakci a následnou konverzi oxidu uhelnatého je poskytováno přímým spalováním části zemního plynu.

Proces má dvě fáze; v první se do páry (500–950 °C, 0,3 - 2,5 MPa) zavádí za přítomnosti katalyzátoru metan (dominantní část zemního plynu). Směs metanu a páry reaguje za vzniku vodíku a oxidu uhelnatého a menšího podílu oxidu uhličitého

Reakce probíhá za výše zmíněných teplot a tlaků v reforméru. Poté následuje navýšování množství produkovaného vodíku konverzí CO z reforméru s další přidanou párou. Reakce probíhá již za nižších teplot.

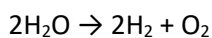
reformní reakce: $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$

konverze CO: $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$

Účinnost produkce vodíku je závislá na poměru páry a uhlíku ve směsi; pohybuje se okolo 80 %. Značnou nevýhodou je produkce vysokého množství oxidu uhličitého – na 1 kg vodíku se vyprodukuje 7,05 kg CO₂. [19]

Elektrolýza

Elektrolýza je proces, při kterém stejnosměrný proud při průchodu vodným roztokem štěpí chemickou vazbu mezi vodíkem a kyslíkem:



H₂ pak reaguje na katodě za vzniku plynu, který je shromažďován a poté skladován. Proces elektrolýzy probíhá při pokojové teplotě a k jeho chodu je zapotřebí pouze elektřina. Přibližně 4 % světové produkce vodíku se vyrábějí tímto způsobem. Ideální (reverzibilní) rozkladné napětí je 1,229 V, ale skutečné napětí je v rozmezí 1,85 - 2,05 V (kvůli nevratnosti reakčního mechanismu a potřebě dodávat určité teplo ve formě elektřiny). Účinnost procesu je pak v rozmezí 80-92 %. Výsledkem elektrolýzy je kyslík a vodík o vysoké čistotě, bez nutnosti dalšího čištění ve většině aplikací. Celková účinnost výroby elektrolytického vodíku vyplývá hlavně z účinnosti výroby elektřiny (30–40 % u konvenčních zdrojů). Celková účinnost elektrolýzy je tedy přibližně 25–35 %. [24]

Vysokoteplotní elektrolýza

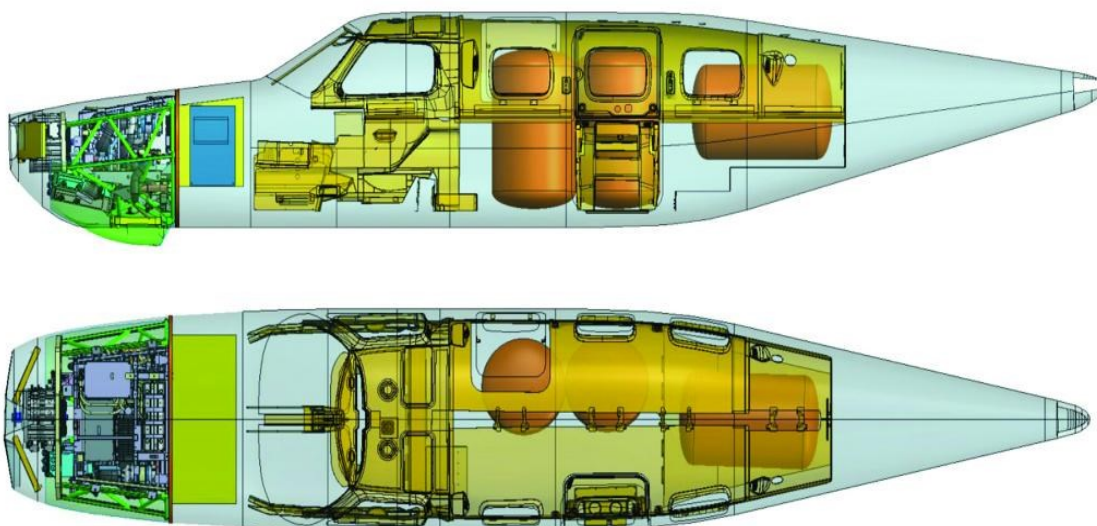
Vysokoteplotní elektrolýza, někdy nazývaná parní elektrolýza, se vyznačuje tím, že část dodávané energie je elektřina a část se dodává jako teplo. Celková účinnost vysokoteplotní elektrolýzy může být až 45 %. [24]

Využití paliva v praxi: ZeroAvia

Kalifornský startup ZeroAvia testuje prototyp leteckého motoru, který jako palivo používá vodík. Výrobce provedl několik zkušebních letů s pohonnou jednotkou zabudovanou do draku letadla Piper Matrix. Vodíkový pohon je určen pro menší letadla s doletem až 800 kilometrů.

Společnost plánuje nabídnout pohonnou jednotku výrobcům letadel v roce 2022. Chce ho využít hlavně v zemědělství, aerotaxi a nákladní přepravě na krátké vzdálenosti.

Technologie využívá stlačeného vodíku uloženého ve válcích z uhlíkových vláken, které se používají i v automobilech na vodíkový pohon. Tyto válce jsou poměrně těžké, a proto je prozatím odhadován dolet na přibližně 800 kilometrů (Obr. 2.10). [25]



Obr. 2.10: Kabina je vybavena nádržemi na plyný vodík o tlaku 350 bar [26]

3 Porovnání alternativních paliv a srovnání s konvenčním palivem

K porovnání byla zvolena čtyři kritéria. Hmotnost paliva spotřebovaného za hodinu letu, tu lze vyjádřit jako podíl spotřebované energie a energetické hustoty v jednom kilogramu. Dále byl zvolen objem paliva na hodinu letu, ten je možné vyjádřit jako podíl spotřebované energie a energetické hustoty na litr paliva. Jako další byla zvolena cena paliva za letovou hodinu, tu lze vyjádřit jako součin spotřebovaného paliva a ceny za jednotku paliva. Jako poslední kritérium byly zvoleny vyprodukované emise CO₂, ty lze vyjádřit jako množství spotřebovaného paliva a množství uvolněného CO₂ na jednotku paliva. Při výpočtu bylo použito analýzy Well to wing (WTW), to znamená, že byly započteny jak emise z výroby paliva Well to tank (WTT), tak emise vyprodukované na letadle Tank to wing (TTW).

Porovnání bude provedeno na letadle Cessna 172 (Obr 3.11).



Obr. 3.11 Cessna 172 [27]

Obecná charakteristika letounu Cessna 172

Posádka/ cestující	Čtyřlenná (1 pilot, 3 pasažéři)
Pohon	Avco Lycoming O-540-L3C5D (175 kW)
Maximální rychlost	346 km/h
Spotřeba paliva/ hodina	32 l
Maximální dolet	1 909 km
Rozpětí	10,92 m
Délka	8,72 m
Výška	2,72 m
Nosná plocha	16,16 m ²
Hmotnost prázdná	815 kg
Maximální vzletová hmotnost	1 406 kg

Tab. 3.1 Tabulka charakteristik letounu Cessna 172

3.1 Tabulka použitých zkratk ve vzorcích

cjp	Cena jednotky paliva
CO ₂ je	Oxid uhličitý na jednotku energie
CO ₂ jp	Oxid uhličitý na jednotku paliva
CO ₂ lh	Oxid uhličitý na letovou hodinu
cplh	Cena paliva na letovou hodinu
eeb	Elektrická energie z baterie
eepc	Elektrická energie z palivového článku
eh	Energetická hustota
mp	Hmotnost paliva
pm	Pístový motor
se	Spotřebovaná energie
sp	Spotřeba paliva
η	Účinnost

Tab. 3.2 Tabulka použitých zkratk ve vzorcích

3.2 Spotřebovaná energie

Pro provedení výpočtů hmotnosti, objemu, ceny a emisí paliva na hodinu letu je nutné znát spotřebu energie na hodinu letu. Tu lze zjistit ze spotřeby konvenčního paliva, energetické hustoty a účinnosti daných pohonů.

3.2.1 Pístový motor

Spotřebovanou energii (energii potřebnou pro hodinu letu při účinnosti pístového motoru 30 %) lze vypočítat jako součin spotřeby konvenčního paliva Avgas 100LL a energetické hustoty daného paliva. Spotřeba konvenčního paliva Avgas 100LL je 32 litrů na letovou hodinu. Energetická hustota jednoho litru Avgasu 100LL je 31,59 MJ. [28]

$$sp * eh = se$$

$$32 * 31,59 = 1\,010,88 \text{ MJ/h}$$

3.2.2 Elektrická energie-baterie

Účinnost pohonu elektrickou energií z baterie je odlišná od pístového motoru (30 %). Účinnost pohonu elektrickou energií z baterie je součinem účinnosti elektromotoru (90 %) a účinnosti akumulátoru (84 %). Z toho vyplývá, že i množství spotřebované energie bude rozdílné. [29] [30]

$$\eta_1 * \eta_2 = \eta$$

$$0,9 * 0,84 = 0,76$$

V tomto případě je spotřebovaná energie (energie potřebná k vykonání hodinového letu při účinnosti pohonu elektromotor-baterie 76 %) vypočítána jako podíl. Ve jmenovateli bude spotřebovaná energie pístového motoru a účinnost pístového motoru (tím se vyjádří množství energie při 100 % účinnosti), v čitateli bude účinnost pohonu elektrickou energií z baterie.

$$(se_{pm} * \eta_{pm})/\eta_{eeb} = se_{eeb}$$

$$\frac{(1010,88 * 0,3)}{0,76} = 399 \text{ MJ/h}$$

3.2.3 Elektrická energie-palivový článek

Účinnost pohonu elektrickou energií z palivového článku je odlišná od pístového motoru (30 %). Účinnost pohonu elektrickou energií z palivového článku je součinem účinnosti elektromotoru (90 %) a účinnosti palivového článku (50 %). Z toho vyplývá, že i množství spotřebované energie bude rozdílné. [29] [31]

$$\eta_1 * \eta_2 = \eta$$

$$0,9 * 0,5 = 0,45$$

V tomto případě je spotřebovaná energie (energie potřebná k vykonání hodinového letu při účinnosti pohonu elektromotor-palivový článek 45 %) vypočítána jako podíl. Ve jmenovateli bude spotřebovaná energie pístového motoru a účinnost pístového motoru (tím se vyjádří množství energie při 100 % účinnosti), v čitateli bude účinnost pohonu elektrickou energií z palivového článku.

$$(se_{pm} * \eta_{pm})/\eta_{eepc} = se_{eepc}$$

$$\frac{(1010,88 * 0,3)}{0,45} = 673,92 \text{ MJ/h}$$

3.3 Hmotnost paliva potřebného na letovou hodinu

Hmotnost paliva je jeden z nejdůležitějších faktorů, vysoká hmotnost paliva snižuje užitečné zatížení. Pro výpočet hmotnosti paliva je nutné znát spotřebované množství energie a energetickou hustotu.

3.3.1 Konvenční palivo Avgas 100LL

Hmotnost paliva je vypočítána jako podíl spotřebované energie a energetické hustoty na jeden kilogram paliva. Spotřeba energie na hodinu letu činí 1 010,88 MJ. Energetická hustota paliva Avgas 100LL je 44 MJ na kilogram. [28]

$$\frac{se}{eh} = mp$$

$$\frac{1010,88}{44} = 23 \text{ kg/h}$$

3.3.2 CNG

Jelikož bude CNG spalováno v pístovém motoru, stejně jako konvenční palivo Avgas 100LL, lze počítat se stejnou účinností (30 %), spotřebované množství energie je tedy stejné 1 010,88 MJ. Hmotnost paliva je vypočítána jako podíl spotřebované energie a energetické hustoty na jeden

kilogram paliva. Spotřeba energie na hodinu letu činí 1 010,88 MJ. Energetická hustota paliva CNG je 53,6 MJ na kilogram. [28]

$$\frac{se}{eh} = mp$$

$$\frac{1010,88}{53,6} = 18,86 \text{ kg/h}$$

3.3.3 LNG

Jelikož bude LNG spalováno v pístovém motoru, stejně jako konvenční palivo Avgas 100LL, lze počítat se stejnou účinností (30 %), spotřebované množství energie je tedy stejné 1 010,88 MJ. Hmotnost paliva je vypočítána jako podíl spotřebované energie a energetické hustoty na jeden kilogram paliva. Spotřeba energie na hodinu letu činí 1 010,88 MJ. Energetická hustota paliva LNG je 53,6 MJ na kilogram. [28]

$$\frac{se}{eh} = mp$$

$$\frac{1010,88}{53,6} = 18,86 \text{ kg/h}$$

3.3.4 LPG

Jelikož bude LPG spalováno v pístovém motoru, stejně jako konvenční palivo Avgas 100LL, lze počítat se stejnou účinností (30 %), spotřebované množství energie je tedy stejné 1 010,88 MJ. Hmotnost paliva je vypočítána jako podíl spotřebované energie a energetické hustoty na jeden kilogram paliva. Spotřeba energie na hodinu letu činí 1 010,88 MJ. Energetická hustota paliva LPG je 49,4 MJ na kilogram. Energetická hustota se může mírně lišit v závislosti na poměru propanu a butanu. [28]

$$\frac{se}{eh} = mp$$

$$\frac{1010,88}{49,4} = 20,5 \text{ kg/h}$$

3.3.5 Elektrická energie (baterie)

Hmotnost paliva je vypočítána jako podíl spotřebované energie a energetické hustoty na jeden kilogram paliva. Spotřeba energie na hodinu letu činí 399 MJ. Energetická hustota lithiové baterie je 0,875 MJ na kilogram. [28]

$$\frac{se}{eh} = mp$$

$$\frac{399}{0,875} = 456 \text{ kg/h}$$

3.3.6 Elektrická energie (palivový článek)

Hmotnost paliva je vypočítána jako podíl spotřebovaného množství energie a energetické hustoty. Spotřebované množství energie je 673,92 MJ, Energetická hustota jednoho kilogramu vodíku je 119,93 MJ. [28]

$$\frac{se}{eh} = mp$$

$$\frac{673,92}{119,93} = 5,62 \text{ kg/h}$$

Z tabulky vyplývá, že nejtěžší možnost uložení paliva je baterie. Nejlehčí se jeví vodík. Z důvodu nedostatku validních informací k palivům nebyla připočítána hmotnost nádrže a systémů.

Palivo	Hmotnost paliva potřebného na letovou hodinu (kg)
Elektrická energie (palivový článek)	5,62
CNG	18,86
LNG	18,86
LPG	20,5
Avgas 100 LL	23
Elektrická energie (baterie)	456

Tab. 3.3 Hmotnost paliva spotřebovaného za letovou hodinu, hodnoty jsou seřazeny od nejpříznivější po nejhorší.

3.4 Objem paliva potřebného na letovou hodinu

Objem paliva se odvíjí od spotřebovaného množství energie a energetické hustoty.

3.4.1 Konvenční palivo Avgas 100LL

Objem konvenčního paliva potřebný na hodinu letu je známý, činí 32 litrů.

3.4.2 CNG

Objem paliva je vypočítán jako podíl spotřebované energie a energetické hustoty na jeden litr paliva. Spotřeba energie na hodinu letu činí 1 010,88 MJ. Energetická hustota paliva CNG je 9 MJ na litr. [28]

$$\frac{se}{eh} = sp$$

$$\frac{1010,88}{9} = 112,32 \text{ l/h}$$

3.4.3 LNG

Objem paliva je vypočítán jako podíl spotřebované energie a energetické hustoty na jeden litr paliva. Spotřeba energie na hodinu letu činí 1 010,88 MJ. Energetická hustota paliva LNG je 22,2 MJ na litr. [28]

$$\frac{se}{eh} = sp$$

$$\frac{1\,010,88}{22,2} = 45,53 \text{ l/h}$$

3.4.4 LPG

Objem paliva je vypočítán jako podíl spotřebované energie a energetické hustoty na jeden litr paliva. Spotřeba energie na hodinu letu činí 1 010,88 MJ. Energetická hustota paliva LPG je 26 MJ na litr. Energetická hustota se může mírně lišit v závislosti poměru propanu a butanu. [28]

$$\frac{se}{eh} = sp$$

$$\frac{1\,010,88}{26} = 38,88 \text{ l/h}$$

3.4.5 Elektrická energie (baterie)

Objem baterie je vypočítán jako podíl spotřebované energie a energetické hustoty na jeden litr baterie. Spotřeba energie na hodinu letu činí 399 MJ. Energetická hustota baterie je 2,63 MJ na litr. [28]

$$\frac{se}{eh} = sp$$

$$\frac{399}{2,63} = 151,7 \text{ l/h}$$

3.4.6 Elektrická energie (palivový článěk)

Objem paliva je vypočítán jako podíl spotřebované energie a energetické hustoty na jeden litr paliva. Spotřeba energie na hodinu letu činí 673,92 MJ. Energetická hustota vodíku je 8,49 MJ na litr. [28]

$$\frac{se}{eh} = sp$$

$$\frac{673,92}{8,49} = 79,4 \text{ l/h}$$

Z tabulky vyplývá, že všechny alternativní porovnávané paliva zabírají větší objem než konvenční Avgas 100LL, nejvíce objemným zdrojem energie jsou baterie.

Palivo	Objem paliva potřebného na letovou hodinu (l)
Avgas 100LL	32,00
LPG	38,88
LNG	45,54
Elektrická energie (palivový článěk)	79,4
CNG	112,32
Elektrická energie (baterie)	151,7

Tab. 3.4 Objem paliva potřebného k vykonání hodinového letu, hodnoty jsou seřazeny od nejpříznivější po nejhorší

3.5 Cena za palivo na letovou hodinu

Cena za letovou hodinu se odvíjí od ceny za jednotku paliva a spotřeby paliva.

3.5.1 Konvenční palivo Avgas 100LL

Cena za palivo na letovou hodinu se rovná součinu spotřebovaného paliva a ceny za jednotku paliva. Obě data jsou známá, cena za litr paliva je 65 Kč (včetně spotřební daně a DPH k 16.4.2021), spotřeba paliva je 32 litrů. [32]

$$sp * cjp = cplt$$

$$32 * 65 = 2\,080 \text{ Kč/h}$$

3.5.2 CNG

Cena za palivo na letovou hodinu se rovná součinu spotřebovaného paliva a ceny za jednotku paliva. Cena paliva se udává za jeden kilogram a činí 27,6 Kč (včetně spotřební daně a DPH k 16.4.2021). Spotřebované množství paliva se udává v kilogramech a činí 18,86 kg. [33]

$$sp * cjp = cplh$$

$$18,6 * 27,6 = 513 \text{ Kč/h}$$

3.5.3 LNG

Cena za palivo na letovou hodinu se rovná součinu spotřebovaného paliva a ceny za jednotku paliva. Cena paliva se udává za jeden kilogram a činí 25 Kč (včetně spotřební daně a DPH k 16.4.2021). Spotřebované množství paliva se udává v kilogramech a činí 18,86 kg. [34]

$$sp * cjp = cplh$$

$$18,86 * 25 = 472 \text{ Kč/h}$$

3.5.4 LPG

Cena za palivo na letovou hodinu se rovná součinu spotřebovaného paliva a ceny za jednotku paliva. Cena paliva se udává za jeden litr a činí 12,5 Kč (včetně spotřební daně a DPH k 16.4.2021). Spotřebované množství paliva se udává v litrech a činí 38,88 l. [35]

$$sp * cjp = cplh$$

$$38,88 * 12,5 = 486 \text{ Kč/h}$$

3.5.5 Elektrická energie (baterie)

Cena za palivo na letovou hodinu se rovná součinu spotřebovaného paliva a ceny za jednotku paliva. Spotřebované množství paliva při pohonu elektrickou energií z baterie je 110,8 kWh (399 MJ). Cena elektrické energie se udává v kilowatthodinách, cena za 1 kWh činí 4,76 Kč (průměrná cena v roce 2020, cena včetně daně). [35]

$$sp * c_{jp} = c_{plh}$$

$$110,8 * 4,76 = 527 \text{ Kč/h}$$

3.5.6 Elektrická energie (palivový článek)

Cena za palivo na letovou hodinu se rovná součinu spotřebovaného paliva a ceny za jednotku paliva. Cena paliva se udává za jeden kilogram a pohybuje se okolo 250 Kč (17.4.2021).

Spotřebované množství paliva se udává v kilogramech a činí 5,62 kg. [36]

$$sp * c_{jp} = c_{plh}$$

$$5,62 * 250 = 1\,405 \text{ Kč/h}$$

Z tabulky ceny za spotřebované palivo vyplývá, že jsou všechny nekonvenční paliva jeví nižší hodnoty než konvenční Avgas 100LL. Nejnižší cena spotřebovaného paliva je u LNG.

Palivo	Cena za letovou hodinu (Kč)
LNG	472
LPG	486
CNG	513
Elektrická energie (baterie)	527
Elektrická energie (palivový článek)	1405
Avgas 100LL	2080

Tab. 3.5 Cena spotřebovaného paliva za letovou hodinu, hodnoty jsou seřazeny od nejpříznivější po nejhorší.

3.6 Emise CO₂ na letovou hodinu

Emise CO₂ na letovou hodinu jsou vypočítány ze spotřeby paliva a množství uvolněného CO₂ na jednotku paliva. Při výpočtu emisí CO₂ bylo použito analýzy Well to Wing (WTW), to znamená, počítalo se jak se spálením paliva, tak s jeho výrobou.

3.6.1 Konvenční palivo Avgas 100LL

Emise CO₂ jsou vypočítány jako součin množství spotřebovaného paliva a CO₂ vyprodukovaného jednotkou paliva. Spotřeba paliva Avgas 100LL na hodinu letu činí 32 litrů, spálení jednoho litru paliva vyprodukuje 3366 g CO₂ (v udané hodnotě je započítáno jak spálení paliva, tak výroba) [37]

$$sp * CO_{2jp} = CO_{2lh}$$

$$32 * 3\,366 = 107\,712 \text{ g/h}$$

3.6.2 CNG

U paliva CNG bylo nutné nejprve vypočítat emise při výrobě a dopravě paliva, následně emise vyprodukované přímo na letadle a poté je sečíst.

WTT (Well to Tank) výroba paliva

Emise CO₂ při výrobě a dopravě jsou vypočítány jako součin množství spotřebované energie a CO₂ vyprodukovaného jednotkou energie. Spotřebovaná energie na hodinu letu činí 1 010,88 MJ, při výrobě jednoho MJ energie v CNG ze směsi zemního plynu mixu EU se vyprodukuje 13 gramů CO₂ [38]

$$se * CO_2je = CO_2lh$$

$$1\,010,88 * 13 = 13\,141\,g/h$$

TTW (Tank to Wing) spotřebování paliva

Emise CO₂ vyprodukované přímo na letadle jsou vypočítány jako součin množství spotřebovaného paliva a CO₂ vyprodukovaného jednotkou paliva. Spotřeba paliva CNG na hodinu letu činí 18,86 kg, spálení jednoho kilogramu paliva vyprodukuje 2 252 g CO₂ [39]

$$sp * CO_2jp = CO_2lh$$

$$18,86 * 2\,252 = 42\,473\,g/h$$

WTW

Celkové emise jsou vypočítány jako součet emisí vyprodukovaných výrobou paliva s emisemi uvolněnými na letadle.

$$WTT + TTW = WTW$$

$$13\,141 + 42\,473 = 55\,614\,g/h$$

3.6.3 LNG

U paliva LNG bylo nutné nejprve vypočítat emise při výrobě a dopravě paliva, následně emise vyprodukované přímo na letadle a poté je sečíst.

WTT

Emise CO₂ při výrobě a dopravě jsou vypočítány jako součin množství spotřebované energie a CO₂ vyprodukovaného jednotkou energie. Spotřebovaná energie hodinu letu činí 1 010,88 MJ, při výrobě jednoho MJ energie v LNG se vyprodukuje 19,4 gramů CO₂ [38]

$$se * CO_2je = CO_2lh$$

$$1\,010,88 * 19,4 = 19\,611\,g/h$$

TTW

Emise CO₂ vyprodukované přímo na letadle jsou vypočítány jako součin množství spotřebovaného paliva a CO₂ vyprodukovaného jednotkou paliva. Spotřeba paliva LNG na hodinu letu činí 18,86 kg, spálení jednoho kilogramu paliva vyprodukuje 2 252 g CO₂ [39]

$$sp * CO_2jp = CO_2lh$$

$$18,86 * 2\,252 = 42\,473\,g/h$$

WTW

Celkové emise jsou vypočítány jako součet emisí vyprodukovaných výrobou paliva s emisemi uvolněnými na letadle.

$$WTT + TTW = WTW$$

$$19\,611 + 42\,473 = 62\,084\text{ g/h}$$

3.6.4 LPG

Emise CO₂ jsou vypočítány jako součin množství spotřebovaného paliva a CO₂ vyprodukovaného jednotkou paliva. Spotřeba paliva LPG na hodinu letu činí 38,88 litrů, jeden litru paliva vyprodukuje 1660 g CO₂ (v udané hodnotě je započítáno jak spálení paliva, tak výroba). [40]

$$sp * CO_2jp = CO_2lh$$

$$38,88 * 1660 = 64\,541\text{ g/h}$$

3.6.5 Elektrická energie (baterie)

U pohonu elektrickou energií z baterie nevznikají žádné lokální emise, avšak emise výroby elektřiny existují, jsou vypočítány jako součin množství spotřebovaného paliva a CO₂ vyprodukovaného jednotkou paliva. Spotřeba paliva činí 110,8 kWh, hodnota emisního faktoru CO₂ z výroby elektřiny v ČR v roce 2019 byla 428 g CO₂/ kWh. [41]

$$sp * CO_2jp = CO_2lh$$

$$110,8 * 428 = 47\,422\text{ g/h}$$

3.6.6 Elektrická energie (palivový článěk)

U pohonu elektrickou energií z palivového článku nevznikají žádné lokální emise, avšak emise při výrobě vodíku existují. Na výrobu 1 kg vodíku elektrolýzou je zapotřebí 9 l vody a 60 kWh elektrické energie. [42] Emise jsou vypočítány jako součin množství spotřebovaného paliva, množství elektřiny k výrobě jednotky paliva a emisí při výrobě jednotky elektrické energie. Spotřeba paliva činí 5,62 kilogramu na hodinu letu, k výrobě jednoho kilogramu vodíku je nutné dodat 60 kWh elektrické energie a hodnota emisního faktoru CO₂ z výroby elektřiny v ČR v roce 2019 byla 428 g CO₂/ kWh. [41]

$$sp * CO_2jp = CO_2lh$$

$$(5,62 * 60) * 428 = 144\,322\text{ g/h}$$

Z tabulky vyplývá, že nejvíce emisí vzniká při pohonu elektrickou energií z palivového článku, toto palivo se jako jediné jeví horší než konvenční palivo Avgas 100LL. Nejlepší hodnoty vykazuje pohon elektrickou energií z baterie, tento pohon také neprodukuje žádné lokální emise.

Palivo	Emise CO₂ na letovou hodinu (g CO₂/h)
Elektrická energie (baterie)	47422
CNG	55614
LNG	62084
LPG	64541
Avgas 100LL	107712
Elektrická energie (palivový článěk)	144322

Tab. 3.6 Vyprodukované emise CO₂ za hodinu letu, hodnoty jsou seřazeny od nejpříznivější po nejhorší.

4 SWOT analýza

SWOT analýza je univerzální analytická technika používaná k hodnocení interních a externích faktorů ovlivňujících úspěch organizace nebo konkrétního projektu (např. nový produkt nebo služba).

4.1 Aplikace SWOT analýzy

Nejčastěji je SWOT analýza používána jako situační analýza ve strategickém řízení a marketingu. Autorem SWOT analýzy je Albert Humphrey, který ji vytvořil v 60. letech. SWOT je zkratka prvních písmen anglických jmen jednotlivých faktorů:

Strengths – silné stránky

Weaknesses – slabé stránky

Opportunities – příležitosti, tedy co lze využít

Threats – hrozby, tedy na co je nutné dávat pozor

[43]

Silné stránky Zde se zaznamenávají skutečnosti, které přinášejí výhodu.	Slabé stránky Zde se zaznamenávají skutečnosti, ve kterých si palivo nevede dobře, nebo ve kterých si ostatní paliva vedou lépe.
Příležitosti Zde se zaznamenávají skutečnosti, které mohou zlepšit perspektivnost daného paliva.	Hrozby Zde se zaznamenávají skutečnosti, které mohou zapříčinit neúspěch daného paliva.

Tab. 4.7 SWOT analýza – popis

4.1.1 SWOT Konvenční palivo Avgas 100LL

Mezi silné stránky patří malý objem paliva, který činí 32 l na hodinu letu, dále je to nízká hmotnost 23 kg a také hustá síť čerpacích stanic, dostupná přímo na letištích. Mezi slabé stránky patří vysoká cena paliva na hodinu letu 2 080 Kč a vysoké emise výfukových plynů. K příležitostem zvýšení perspektivnosti využívání tohoto paliva je možné zařadit zvyšování efektivity pístových motorů. Jako hlavní hrozba se jeví přísné emisní limity, především v Evropské unii je pozorováno zavádění přísných regulací a norem. Další nevýhodou je, že zdroje ropy nejsou nevyčerpatelné, z toho plyne, že v budoucnu se dá očekávat zdražování.

<p>Silné stránky</p> <p>Nízký objem Nízká hmotnost Hustá síť čerpacích stanic</p>	<p>Slabé stránky</p> <p>Vysoká cena paliva Vysoké emise CO₂</p>
<p>Příležitosti</p> <p>Vývoj efektivnějších spalovacích motorů</p>	<p>Hrozby</p> <p>Zavedení přísných emisních limitů Růst ceny paliva</p>

Tab.4.8 SWOT analýza konvenčního paliva Avgas 100LL

4.1.2 SWOT CNG

Mezi silné stránky patří především nízká cena paliva, hodina letu vychází na 513 Kč, dále jsou to nízké emise CO₂, které činí 55 614 g na hodinu letu a také zvýšení životnosti motoru vlivem vyšší čistoty oleje a spalovacího prostoru. Mezi slabé stránky lze zařadit vysokou hmotnost nádrže, absenci CNG plnicích stanic, a především značný objem paliva, který činí 112,32l na hodinový let. Mezi příležitosti patří vývoj lehčích nádrží, ať už pokrokem v metalurgii nebo vývojem nových kompozitových nádrží. Mezi hrozby patří nutnost vybudování plnicích stanic na letištích, které by bylo možné jen při masivním využívání tohoto paliva.

<p>Silné stránky</p> <p>Nízká cena za letovou hodinu Nízké emise CO₂ Zvýšení životnosti motoru</p>	<p>Slabé stránky</p> <p>Vysoká hmotnost nádrže Nyní neexistují CNG plnicí stanice na letištích Značný objem paliva</p>
<p>Příležitosti</p> <p>Vývoj lehčích CNG nádrží</p>	<p>Hrozby</p> <p>Nákladné vybudování CNG plnicích stanic na letištích</p>

Tab. 4.9 SWOT analýza CNG

4.1.3 SWOT LNG

Mezi silné stránky se může zařadit cena provozu na LNG, která vyšla jako vůbec nejnižší, a to 472 Kč na hodinu letu. Dále je to přijatelná hodnota emisí CO₂, která činí 62 084 g na hodinu letu, stejně jako u CNG je to zvýšení životnosti motoru, dále nízká hmotnost paliva 18,86 kg na hodinu a nízký objem 45,54 litru na hodinu. K příležitostem zvýšení perspektivnosti využívání tohoto paliva je možné zařadit zvyšování efektivnosti pístových motorů. Mezi slabé stránky se řadí absence LNG

plnicích stanic a neustálé odpařování paliva a to asi 0,17 % za jeden den. Dále je to skladování při nízkých teplotách pod -162 °C. Mezi hrozby patří nutnost vybudování plnicích stanic na letištích, které by bylo možné jen při masivním využívání tohoto paliva.

<h3>Silné stránky</h3> <p>Nejnižší cena za letovou hodinu Přijatelná hodnota emisí CO₂ Zvýšení životnosti motoru Nízká hmotnost paliva s nádrží Objem paliva</p>	<h3>Slabé stránky</h3> <p>Nyní neexistují LNG plnicí stanice na letištích Odpařování paliva Kryogenní palivo</p>
<h3>Příležitosti</h3> <p>Vývoj efektivnějších spalovacích motorů</p>	<h3>Hrozby</h3> <p>Nákladné vybudování LNG plnicích stanic na letištích</p>

Tab. 4.10 SWOT analýza LNG

4.1.4 SWOT LPG

Mezi silné stránky se řadí nízká cena za letovou hodinu, která činí 486 Kč, dále jsou to přijatelné emise CO₂, tj. 64 541 g na hodinu letu. Dochází také k prodloužení životnosti motoru z důvodu čistějšího spalovacího prostoru a oleje. Hmotnost paliva na hodinu letu činí 20,5 kg. Objem paliva je 38,88 l na hodinu letu. K příležitostem zvýšení perspektivnosti využívání tohoto paliva je možné zařadit zvyšování efektivnosti pístových motorů. Slabé stránky spočívají v absenci LPG plnicích stanic na letištích. Mezi hrozby patří nutnost vybudování plnicích stanic na letištích, které by bylo možné jen při masivním využívání tohoto paliva.

<h3>Silné stránky</h3> <p>Nízká cena za letovou hodinu Přijatelné emise CO₂ Zvýšení životnosti motoru Nízká hmotnost paliva s nádrží Malý objem paliva</p>	<h3>Slabé stránky</h3> <p>Nyní neexistují LPG plnicí stanice na letištích</p>
<h3>Příležitosti</h3> <p>Vývoj efektivnějších spalovacích motorů</p>	<h3>Hrozby</h3> <p>Nákladné vybudování LPG plnicích stanic na letištích</p>

Tab. 4.11 SWOT analýza LPG

4.1.5 SWOT Elektrická energie (baterie)

Mezi silné stránky lze zařadit cenu za letovou hodinu 527 Kč a z porovnávaných paliv nejnižší emise CO₂, které činí 47 422 g na hodinu letu. Největší a velmi významnou slabou stránkou je vysoká hmotnost paliva, na hodinu letu činí 456 kg a také značný objem 151,7 litru. Mezi příležitostmi se řadí snižování emisí CO₂ výrobou elektřiny z nefosilných paliv, mezi hrozby je možné zařadit vývoj baterií s vyšší energetickou hustotou, energetická hustota se u moderních akumulátorů stále zvyšuje, v současnosti je ale nepravděpodobné, že by dosáhla potřebných hodnot.

Silné stránky Nízká cena za letovou hodinu Nízké emise CO ₂	Slabé stránky Nejvyšší hmotnost paliva Nejvyšší objem paliva
Příležitosti Snížení emisí CO ₂ výroby elektřiny	Hrozby Vývoj baterií s vyšší energetickou hustotou

Tab. 4.12 SWOT analýza Elektrická energie (baterie)

4.1.6 SWOT Elektrická energie (palivový článek)

Mezi výhody patří nízká hmotnost paliva, která činí 5,62 kg na hodinu letu. Mezi slabé stránky se řadí vysoká cena za hodinu letu, a to 1 405 Kč. Ačkoli je vodíkový pohon považován za ekologický díky nulovým lokálním emisím, celkové emise jsou nejvyšší ze všech paliv, na hodinu letu činí 144 322 g. Další nevýhoda se pojí s vysokou výbušností paliva a s faktem, že zkapalněný vodík je třeba uchovávat při -250 °C a plynný vodík v těžkých nádržích. Příležitostí by mohlo být snížení vyprodukovaných emisí a ceny při výrobě vodíku, výroba by mohla být uskutečněna z přebytků elektrické energie z obnovitelných zdrojů. Mezi hrozby se řadí absence vodíkových plnicích stanic, vybudování by bylo možné jen při masivním rozšíření tohoto paliva.

<p>Silné stránky</p> <p>Nízká hmotnost paliva</p>	<p>Slabé stránky</p> <p>Vysoká cena za hodinu letu</p> <p>Vysoké emise CO₂</p> <p>Bezpečnost</p> <p>Kryogenní palivo</p>
<p>Příležitosti</p> <p>Snížení emisí při výrobě vodíku</p> <p>Snížení ceny vodíku</p>	<p>Hrozby</p> <p>Nákladné vybudování plnicích stanic na letištích</p>

Tab. 4.13 SWOT analýza Elektrická energie (palivový článek)

4.2 Vyhodnocení

Na základě výpočtů a SWOT analýz bylo vyvozeno rozhodnutí, že se jako nejperspektivnější palivo jeví zkapalněný ropný plyn LPG.

Mezi silné stránky se řadí nízká cena za letovou hodinu, která činí 486 Kč, dále jsou to přijatelné emise CO₂, tj. 64 541 g na hodinu letu. Dochází také k prodloužení životnosti motoru z důvodu čistějšího spalovacího prostoru a oleje. Hmotnost paliva i nádrže je přijatelná, na hodinu letu činí 20,5 kg. Objem paliva je 38,88 l na hodinu letu.

Jediná slabá stránka je absence plnicích stanic na letištích. Celková technologie skladování a spalování je bezproblémová, to potvrzuje i letitá praxe provozu na LPG v automobilech.

Jako nejméně vhodné řešení se jeví pohon na elektrickou energii z baterie, důvodem je enormní hmotnost.

5 Závěr

Bakalářská práce analyzuje současná alternativní paliva a možnosti jejich využití v praxi. Jako kritéria k porovnání paliv byly zvoleny cena za letovou hodinu, emise CO₂ vyprodukované za letovou hodinu, dále hmotnost a objem paliva potřebného k vykonání hodiny letu. S pomocí vhodně zvolených kritérií byla jednotlivá alternativní paliva mezi sebou porovnávána a následně ukázány jejich odlišnosti oproti konvenčně používanému palivu u leteckých motorů. Výsledky získané při výpočtu jednotlivých porovnávacích kritérií byly zaznamenány do přehledných tabulek a následně byly zohledněny ve SWOT analýze, s jejíž pomocí bylo možné doporučit nejvhodnější alternativní palivo pro budoucí komerční využití.

V současnosti se jako nejvhodnější alternativa jeví fosilní paliva, zkapalněný ropný plyn, zkapalněný zemní plyn a stlačený zemní plyn. Jako nejméně vhodný se jeví pohon elektrickou energií z baterie z důvodu nízké energetické hustoty baterií. V budoucnu by bylo možné mezi perspektivní paliva zařadit také vodík, za předpokladu, že dojde k rozšíření výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů a vodík by byl vyráběn z energetických přebytků.

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Vojtěchu Grafovi, Ph.D. za odborné vedení práce, poskytnutí cenných rad a připomínek a současně za vstřícnost projevenou při konzultacích a vypracovávání práce.

Seznam použitých zdrojů

- [1] JETEX. Focus on Fuel Part One: Different Types of Aviation Fuel. *JETEX* [online]. [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://www.jetex.com/focus-fuel-part-one-different-types-aviation-fuel/>
- [2] JENÍKOVSKÝ, Petr, 2015. *Diagnostický rozbor vstřikovací soustavy vozidla pro plyné PHM* [online]. [cit. 2021-2-16]. Dostupné z: <https://adoc.pub/zapadoeska-univerzita-v-plzni-fakulta-strojni-studijni-progr335bd5df247590f9f76f0448dea434ea45188.html>
- [3] CNG type-3 cylinder [online]. [cit. 2021-2-16]. Dostupné z: https://beijingctic.en.ecplaza.net/products/cng-type-3-cylinder_1446218
- [4] Bezpečnost. CNG+ [online]. 24.4.2012 [cit. 2021-2-22]. Dostupné z: <https://www.cngplus.cz/o-cng/bezpecnost.html>
- [5] Technologie stanic. CNG.CZ [online]. [cit. 2021-1-11]. Dostupné z: <https://www.cng.cz/stanice/technologie-stanic>
- [4] BERGQVIST, Pia. Aviat Introduces Dual-Fuel Husky CNG. *FLYING* [online]. 29.7.2013 [cit. 2021-1-30]. Dostupné z: <https://www.flyingmag.com/aircraft/pistons/aviat-introduces-dual-fuel-husky-cng/>
- [5] Letadlo na CNG-kuriozita nebo budoucnost? CNG+ [online]. 29.7.2013 [cit. 2021-2-27]. Dostupné z: <https://www.cngplus.cz/novinky/letadlo-na-cng-kuriozita-nebo-budoucnost.html>
- [6] Aviat CNG Husky. *PLANE&PILOT* [online]. 19.2.2016 [cit. 2021-2-28]. Dostupné z: <https://www.planeandpilotmag.com/article/aviat-cng-husky/>
- [7] LNG-ZKAPALNĚNÝ ZEMNÍ PLYN. VPS [online]. [cit. 2021-3-25]. Dostupné z: <https://www.vpsr.cz/lng>
- [8] AONG manager. LNG Liquefaction and Purification Processes. *AONG website* [online]. 22.8.2017 [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://www.arab-oil-naturalgas.com/lng-liquefaction-and-purification-processes/>
- [9] Tu 155. *SECRET PROJECTS* [online]. [cit. 2021-3-14]. Dostupné z: <https://www.secretprojects.co.uk/attachments/tu-155-internal-jpg.45151>
- [10] Tu-155 testbed for cryogenic fuel system, A.A.Tupolev. *RUSSIAN AVIATION MUSEUM* [online]. 16.2.2002 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <http://www.ram-home.com/ram-old/tu-155.html>
- [11] Tupolev Tu-155. *RUSLET* [online]. 29.11.2017 [cit. 2021-3-6]. Dostupné z: <https://ruslet.webnode.cz/technika/ruska-technika/letecka-technika/a-n-tupolev/tu-155>

[12] Tupolev cryoplanes. *SECRET PROJECTS* [online]. [cit. 2021-3-14]. Dostupné z: <https://www.secretprojects.co.uk/threads/tupolev-cryoplanes.4217/#post-110339>

[13] Co je bioplyn? *Česká bioplynová asociace* [online]. [cit. 2021-3-8]. Dostupné z: <https://www.czba.cz/co-je-bioplyn.html>

[14] Využití bio(plynu)metanu v dopravě – BioCNG. *Česká bioplynová asociace* [online]. 2011 [cit. 2021-3-8]. Dostupné z: https://www.czba.cz/files/ceska-bioplynova-asociace/uploads/files/19_VPBPS2011_zakovec.pdf

[15] HRBEK, Jan, 2014. *Současný stav a možnosti dalšího využívání alternativních forem energie v dopravě* [online]. [cit. 2021-3-23]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/61226/F3-BP-2015-Hrbek-Jan-BP%20Soucasny%20stav%20a%20moznosti%20dalsiho%20vyuzivani%20alternativnich%20forem%20energie%20v%20doprave-%20bez%20podpisu.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

[16] ŠPÁS, Milan. Alternativní pohony CNG a LPG v silniční dopravě. *DIGITÁLNÍ KNIHOVNA Univerzity Pardubice* [online]. 2009 [cit. 2021-3-12]. Dostupné z: https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/33837/SpasM_Altativni%20pohony_SG_2009.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[17] ZŁOTY, Piotr. Mi-8TG – LPG-powered helicopter. *GAZEO.COM* [online]. 25.05.2015 [cit. 2021-3-16]. Dostupné z: <https://gazeo.com/up-to-date/news/2015/Mi-8TG-LPG-powered-helicopter,news,8670.html>

[18] Mil Mi-8TG. *RUSLET* [online]. 8.3.2017 [cit. 2021-4-23]. Dostupné z: <https://ruslet.webnode.cz/technika/ruska-technika/letecka-technika/m-l-mil/mi-8tg/>

[19] CETL, Tomáš. Lithiové akumulátory velkých výkonů a jejich použití. *ELEKTRO* [online]. 2005 [cit. 2021-3-26]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/lithiove-akumulatory-velkych-vykonu-a-jejich-pouziti--13384>

[20] TICHÝ, Jiří. Lithiové akumulátory: Přehled základních typů a jejich vlastností. *Tzbinfo* [online]. 15.7.2019 [cit. 2021-3-27]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/13612-lithiove-akumulatory>

[21] VELIS ELECTRO: ARRIVING FROM THE FUTURE, EASA TYPE-CERTIFIED NOW. *PIPISTREL* [online]. [cit. 2021-3-27]. Dostupné z: <https://www.pipistrel-aircraft.com/aircraft/electric-flight/velis-electro-easa-tc>

[22] PORŠ, Zdeněk, 2002. *Palivové články: Funkce palivového článku* [online]. [cit. 2021-2-5]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/palivove-clanky.pdf>

[23] DLOUHÝ, Petr a Luděk JANÍK. TRANSPORT A SKLADOVÁNÍ VODÍKU. *HYTEP* [online]. 17.5.2007 [cit. 2021-2-8]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/transport-a-skladovani-vodiku/618-skladovani-vodiku-i>

[24] SOMOLOVÁ, Markéta a DLOUHÝ, Petr. VÝROBA VODÍKU. *HYTEP* [online]. 9.5.2007 [cit. 2021-4-3]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/vyroba-vodiku/664-vyroba-vodiku>

[25] BYRTUS, Filip. Startup ZeroAvia testuje vodíkový motor na Piperu Matrix. *AEROWEB* [online]. 15.08.2019 [cit. 2021-4-3]. Dostupné z: <https://www.aeroweb.cz/clanky/7021-startup-zeroavia-testuje-vodikovy-motor-na-piperu-matrix>

[26] ZeroAvia Prepares For Hydrogen Fuel-Cell Propulsion Flight Tests. *AVIATION WEEK* [online]. 8.7.2020 [cit. 2021-4-2]. Dostupné z: <https://aviationweek.com/aerospace/emerging-technologies/zeroavia-prepares-hydrogen-fuel-cell-propulsion-flight-tests>

[27] CESSNA 172 M – OK-BAF. *BLUESKY AVIATION* [online]. [cit. 2021-4-6]. Dostupné z: <https://blueskyaviation.cz/pronajem-letadel/cessna-172/ulsion-flight-tests>

[28] Energy density. *WIKIPEDIA* [online]. 12.4.2021 [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_density

[29] SKOŘEPA, Martin. Revoluční motor pro elektromobily. *Garáž.cz* [online]. 18.3.2020 [cit. 2021-3-20]. Dostupné z: <https://elektrickevozy.cz/clanky/revolucni-motor-pro-elektromobily>

[30] VALÁŠEK, Dominik. Srovnání energetické ztráty elektromobilů a běžných aut. *Garáž.cz* [online]. 10.9.2018 [cit. 2021-3-20]. Dostupné z: <https://www.garaz.cz/clanek/srovnani-energeticke-ztraty-elektromobilu-a-beznych-aut-21000070#:~:text=Paradoxn%C4%9B%20jedny%20z%20nejv%C4%9Bt%C5%A1%C3%ADch%20ztr%C3%A1t,v%C5%A1ech%20elektrick%C3%BDch%20a%20mechanick%C3%BDch%20odpor%C5%AF>

[31] PALIVOVÝ ČLÁNEK. *DEVINN* [online]. 11.8.2019 [cit. 2021-3-20]. Dostupné z: <https://www.devinn.cz/palivovy-clanek/>

[32] CENÍK POHONNÝCH HMOT. *Letiště Letňany* [online]. 16.4.2021 [cit. 2021-4-16]. Dostupné z: https://www.letnany-airport.cz/?page_id=45&lang=cs

[33] Jaká je aktuální a budoucí cena CNG. *E.ON* [online]. 16.4.2021 [cit. 2021-4-16]. Dostupné z: <https://www.eon.cz/radce/jaka-je-aktualni-a-budouci-cena-cng>

[34] Prodej energie Louny. *SPOLGAS* [online]. 16.4.2021 [cit. 2021-4-16]. Dostupné z: <https://www.spolgas.cz/>

[34] Ceník. *ONO* [online]. 16.4.2021 [cit. 2021-4-16]. Dostupné z: <http://m.tank-ono.cz/cz/index.php?page=cenik>

[35] *Cena elektřiny za kWh opět zdražila. V roce 2020 stojí 4,76 Kč* [online]. 9.3.2020 [cit. 2021-4-16]. Dostupné z: <https://www.elektrina.cz/cena-elektřiny-za-kwh-2020-cez-eon-pre-bohemia-centropol-a-dalsi>

[36] KINKOR, Ondřej. Vodík míří do Česka. *Forbes* [online]. 2.11.2020 [cit. 2021-4-16]. Dostupné z: <https://forbes.cz/vodik-miri-do-ceska-natankujete-v-praze-brne-nebo-litvinove-a-z-vyfuku-vam-pujde-jen-para/#:~:text=Cena%20vod%C3%ADku%20se%20nyn%C3%AD%20obvykle,2%2C50%20K%C4%8D%20na%20kilometr.>

[37] NOVOTNÝ, Robin. Kolik oxidu uhličitýho vypouští vozidlo do ovzduší. *FDrivecz* [online]. 13.4.2020 [cit. 2021-4-16]. Dostupné z: <https://fdrive.cz/clanky/kolik-oxidu-uhliciteho-vypousti-vozidlo-do-ovzdusi-velke-srovnani-podle-pohonu-6874>

[38] ASSEFA HAGOS, Dejene. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* [online]. prosinec 2018 [cit. 2021-4-16]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920918300348>

[39] How to calculate the CO2 emission from the fuel consumption? *ECOSCORE* [online]. 3.12.2020 [cit. 2021-4-16]. Dostupné z: <https://ecoscore.be/en/info/ecoscore/co2>

[40] SAJDL, Jan. Výpočet emisí CO2. *Autolexicon* [online]. [cit. 2021-4-16]. Dostupné z: <https://www.autolexicon.net/cs/articles/vypocet-emisi-co2/>

[41] Hodnota emisního faktoru CO2 z výroby elektřiny za léta 2010–2019. *MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU* [online]. 8.1.2021 [cit. 2021-4-16]. Dostupné z: https://www.mpo.cz/cz/energetika/statistika/elektrina-a-teplo/hodnota-emisniho-faktoru-co2-z-vyroby-elektřiny-za-leta-2010_2019--258830/

[42] VÝROBA VODÍKU. *DEVINN* [online]. 5.8.2019 [cit. 2021-4-16]. Dostupné z: <https://www.devinn.cz/vyroba-vodiku/#:~:text=P%C5%99i%20elektrol%C3%BDze%20vody%20se%20pr%C5%AFchodem,a%2060%20kWh%20elektrick%C3%A9%20energie.>

[43] SWOT analýza. *MANAGEMENT MANIA* [online]. 30.09.2020 [cit. 2021-4-9].
Dostupné z: <https://managementmania.com/cs/swot-analyza>

Seznam použitých obrázků

Obr. 2.1 CNG nádrž z hliníku a karbonových vláken

Obr. 2.2 Husky Aviat s CNG nádrží pod trupem letounu

Obr. 2.3 Vnitřní uspořádání TU-155

Obr. 2.4 Projekty letounů na LNG

Obr. 2.5 Vrtulník Mi-8TG s nádržemi na LPG

Obr. 2.6 Princip funkce lithiových akumulátorů

Obr. 2.7 Uložení baterií

Obr. 2.8 Motorový prostor

Obr. 2.9 Schéma znázornění palivového článku

Obr. 2.10 Kabina je vybavena nádržemi na plynný vodík o tlaku 350 bar

Obr. 3.11 Cessna 172

Seznam tabulek

Tab. 3.1 Tabulka charakteristik letounu Cessna 172

Tab. 3.2 Tabulka použitých zkratek ve vzorcích

Tab. 3.3 Hmotnost paliva spotřebovaného za letovou

Tab. 3.4 Objem paliva potřebného k vykonání hodinového letu

Tab. 3.5 Cena spotřebovaného paliva za letovou hodinu

Tab. 3.6 Vyprodukované emise CO₂ za hodinu letu

Tab. 4.7 SWOT analýza-popis

Tab.4.8 SWOT analýza konvenčního paliva Avgas 100LL

Tab. 4.9 SWOT analýza CNG

Tab. 4.10 SWOT analýza LNG

Tab. 4.11 SWOT analýza LPG

Tab. 4.12 SWOT analýza Elektrická energie (baterie)

Tab. 4.13 SWOT analýza Elektrická energie (palivový článek)